



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Diamagnetická levitace

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2612 – Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy  
*Autor práce:* **Jiří Novotný**  
*Vedoucí práce:* Ing. Bc. Jiří Primas, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# Diamagnetic levitation

## Bachelor thesis

*Study programme:* B2612 – Electrical Engineering and Informatics  
*Study branch:* 2612R011 – Electronic Information and Control Systems

*Author:* **Jiří Novotný**  
*Supervisor:* Ing. Bc. Jiří Primas, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří Novotný**

Osobní číslo: **M15000110**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**

Název tématu: **Diamagnetická levitace**

Zadávací katedra: **Ústav nových technologií a aplikované informatiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte podrobnou rešerši na téma magnetických vlastností látek s akcentem na diamagnetika.
2. Vytvořte návrh konkrétního demonstračního experimentu, který by při výuce sloužil k předvádění jevu známého jako diamagnetická levitace.
3. Zkonstruujte demonstrační přípravek pro diamagnetickou levitaci.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

[1] FEYNMAN, R. P. Feynmanovy přednášky z fyziky, díl 2. FRAGMENT Havlíčkův Brod, 2001, ISBN 80-7200-420-4.

[2] Using Bismuth to make a levitation device, [cit. 2018-05-05],  
URL:<<https://www.bismuthcrystal.com/lev.html>>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Bc. Jiří Primas, Ph.D.**  
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2018**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **30. dubna 2019**

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

24. 4. 2019

Jiří Novotný

## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Bc. Jiřímu Primasovi, Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost a odbornou pomoc při tvorbě této bakalářské práce.

Dále děkuji Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za její ochotu a odbornou pomoc při realizaci odlitku a Ústavu nových technologií a aplikované informatiky za umožnění realizace této bakalářské práce v její laboratoři.

## Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřená na návrh a sestavení modelu diamagnetické levitace pro demonstrační experiment. Zabývá se magnetismem, rozdělením magnetických látek na paramagnetické, feromagnetické a diamagnetické, a jejich fyzikálními vlastnostmi.

Dále je v bakalářské práci popsán výběr vhodné diamagnetické látky, výpočet nejvhodnějšího tvaru pro co největší odpudivou magnetickou sílu a pro centrování levitujícího magnetu. A za pomoci programu FEMM s využitím metody konečných prvků, je uveden návrh bismutového modelu ve tvaru polokoule. Pro bismutový odlitek je zde popsána technologie gravitačního lití do pískové formy s použitím 3D modelu polokoulí, vytvořeného v programu Autodesk Inventor a vytištěného 3D tiskárnou. Demonstrační model diamagnetické levitace navržený v bakalářské práci je sestaven z opracovaných bismutových odlitků ve tvaru polokoulí a neodymového magnetu.

Závěrem celé práce je funkční praktický model k demonstraci diamagnetické levitace.

**Klíčová slova:** bismut, magnetická síla, diamagnetická levitace, metoda konečných prvků, odlévání

## Abstract

The bachelor thesis is focused on the design and construction of the diamagnetic levitation model for a demonstration experiment. It deals with magnetism, division of magnetic substances into three main categories - paramagnetic, ferromagnetic and diamagnetic, and their physical properties.

Furthermore, the bachelor thesis describes the selection of a suitable diamagnetic substance, calculation of the most suitable shape for the strongest repulsive magnetic force and for centering of the levitating magnet. And with the help of FEMM program using the finite element method, the design of the hemispherical bismuth model is presented. For bismuth casting, sand gravity casting technology is described using a 3D hemisphere model created in Autodesk Inventor and printed with a 3D printer. The demonstration model of diamagnetic levitation proposed in the thesis is composed of machined bismuth castings in the shape of hemispheres and neodymium magnet.

The result is a working practical experiment demonstrating the phenomenon of diamagnetic levitation.

**Key Words:** bismuth, magnetic force, diamagnetic levitation, finite element method, casting



# Obsah

Seznam obrázků.....	10
Seznam zkratk .....	11
1 Úvod .....	12
2 Magnetismus.....	13
2.1 Magnetické pole .....	14
2.2 Magnetická síla působící na vodič .....	15
2.3 Moment na proudové smyčce .....	18
2.4 Magnetická síla působící na dipól.....	20
3 Rozdělení látek podle magnetických vlastností .....	22
3.1 Struktura magnetických látek.....	22
3.2 Paramagnetické látky .....	23
3.2.1 Příklady paramagnetických látek.....	23
3.3 Diamagnetické látky.....	24
3.3.1 Příklady diamagnetických látek.....	24
3.4 Feromagnetické látky .....	24
3.4.1 Příklady feromagnetických látek .....	26
3.5 Permanentní magnety .....	26
3.5.1 Neodymový magnet.....	26
4 Návrh modelu .....	27
4.1.1 Výběr magnetu.....	28
4.2 Tvar bismutu .....	28
4.2.1 Software FEMM 4.2 .....	29
4.2.2 Vytvoření simulace .....	29
4.2.3 Model s tvarem polokoule .....	30
4.2.4 Model s tvarem ploskovypouklé čočky s rádiusem $45^\circ$ .....	33
4.2.5 Model s tvarem válce .....	33
4.2.6 Vybrání nejvhodnějšího tvaru modelu.....	34
5 Vytvoření modelu.....	35
5.1 3D model k vytvoření formy.....	35
5.1.1 Tvar 3D modelu .....	35
5.1.2 Tisk 3D modelu .....	36

5.2	Písková forma.....	36
5.2.1	Vytvoření pískové formy .....	37
5.3	Odlití odlitku .....	39
5.4	Zbroušení odlitku .....	41
6	Sestavení demonstračního modelu .....	42
6.1	Návrh 3D demonstračního modelu .....	42
6.2	Sestavení demonstračního modelu .....	43
6.3	Diamagnetická levitace .....	44
7	Závěr.....	46
	Použitá literatura .....	47
A	Přílohy.....	49
A.1	Příloha bakalářské práce.....	49
A.2	Obsah na CD .....	49

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1:</b> Magnetické pole vytvořené magnetem .....	13
<b>Obrázek 2:</b> Přitažlivé a odpuzivé síly dvou magnetů .....	13
<b>Obrázek 3:</b> Směr magnetické síly .....	14
<b>Obrázek 4:</b> Prohnutí drátu s protékajícím proudem v magnetickém poli .....	16
<b>Obrázek 5:</b> Magnetická síla působící na vodič .....	16
<b>Obrázek 6:</b> Zakřivený drát v magnetickém poli .....	17
<b>Obrázek 7:</b> Proudová smyčka umístěná v homogením magnetickém poli .....	18
<b>Obrázek 8:</b> Pootočená proudová smyčka o úhel $\theta$ .....	19
<b>Obrázek 9:</b> Pravidlo pravé ruky .....	20
<b>Obrázek 10:</b> Magnetický dipól v blízkosti magnetu .....	20
<b>Obrázek 11:</b> Válec s N magnetickými dipólovými momenty .....	22
<b>Obrázek 12:</b> Feromagnetické domény .....	25
<b>Obrázek 13:</b> Hysterezní smyčka .....	25
<b>Obrázek 14:</b> Navrhovaný model.....	27
<b>Obrázek 15:</b> Neodymový magnet 5 x 5 x 5 mm .....	28
<b>Obrázek 16:</b> Přenesený model z AutoCADu s definovanými materiály.....	30
<b>Obrázek 17:</b> Zobrazení vygenerované sítě uzlových bodů .....	31
<b>Obrázek 18:</b> Grafické zobrazení – model s tvarem polokoule .....	32
<b>Obrázek 19:</b> Grafické zobrazení – model s tvarem ploskovypouklé čočky .....	33
<b>Obrázek 20:</b> Grafické zobrazení – model s tvarem válce.....	34
<b>Obrázek 21:</b> Navrhnutý 3D model .....	35
<b>Obrázek 22:</b> Vytisknutý 3D model.....	36
<b>Obrázek 23:</b> Příprava formy.....	37
<b>Obrázek 24:</b> Horní část pískové formy .....	38
<b>Obrázek 25:</b> Vytvořený vtok do pískové formy.....	39
<b>Obrázek 26:</b> Lití bismutu do pískové formy .....	40
<b>Obrázek 27:</b> Odlitek z bismutu.....	40
<b>Obrázek 28:</b> Vyleštěný odlitek ve tvaru polokoule z bismutu .....	41
<b>Obrázek 29:</b> Demonstrace diamagnetické síly .....	42
<b>Obrázek 30:</b> Návrh 3D demonstračního modelu.....	43
<b>Obrázek 31:</b> Přichycení bismutové polokoule k desce.....	44
<b>Obrázek 32:</b> Diamagnetická levitace.....	45

## Seznam zkratek

$E$	Elektrické pole
$B$	Magnetické pole
$Q$	Náboj
$v$	Rychlost
$F_B$	Magnetická síla
$W$	Práce
$S$	Plocha
$v_d$	driftové rychlosti
$\hat{n}$	Jednotkový vektor
$l$	Délka
$T$	Čas
$S$	Průměr
$I$	Proud
$M$	Magnetizace (Moment)
$\sin$	Sinus
$\cos$	Kosinus
$\mu$	Dipólový moment
$D$	Moment dvojce sil
$\nabla$	Gradient
$\partial$	Znak parciální derivace
$D$	Znak derivace
$B_0$	Vnější magnetické pole
$\chi_m$	Magnetická susceptibilita
$\mu_m$	Relativní permeabilita
$\mu_0$	Permeabilita vakua
$\mu$	Absolutní permeabilita materiálu
$B_m$	Magnetické pole materiálu
$A$	Ampér
$M$	Metr
$Nd$	Neodym
$Fe$	Železo
$B$	Bór
$^{\circ}C$	Stupně Celsia
$F_M$	Magnetická síla
$F_G$	Tíhová síla
$F_D$	Diamagnetická síla
CAD	Počítačem podporované projektování

# 1 Úvod

Obsahem této bakalářské práce je vytvoření modelu k prezentaci demonstračního experimentu diamagnetická levitace, která funguje na principu odpuzivé magnetické síly mezi magnetem a diamagnetickou látkou.

První zmínka o diamagnetických látkách je z roku 1778, kde si nizozemský botanik a lékař Sebald Justinus Brugmans všiml zvláštního chování některých předmětů v magnetickém poli. Název diamagnetismus dal tomuto jevu až v roce 1845 anglický fyzik a chemik Michael Faraday.

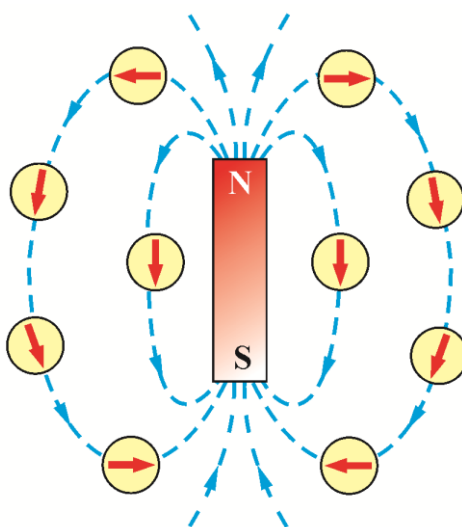
V úvodní části bakalářské práce jsem zpracoval rešerši na téma magnetismu s důrazem na teorii magnetického pole, magnetické síly působící na vodič a dipól. Dále jsem se zabýval rozdělením pevných látek podle jejich magnetických vlastností na feromagnetické, paramagnetické a diamagnetické.

V druhé části bakalářské práce jsem navrhl model pro demonstrační experiment a vytvořil jsem simulaci pomocí programu FEMM 4.2 s využitím metody konečných prvků. Na základě této simulace jsem vypočítal a stanovil nejvhodnější tvar diamagnetické látky. Na základě nejvhodnější permeability jsem pro demonstraci diamagnetické levitace zvolil vhodný materiál bismut.

Ve zbylých částech bakalářské práce jsem vytvořil odlitky polokoulí z bismutu, pomocí kterých jsem sestavil model demonstračního experimentu, z vytvořeného 3D návrhu.

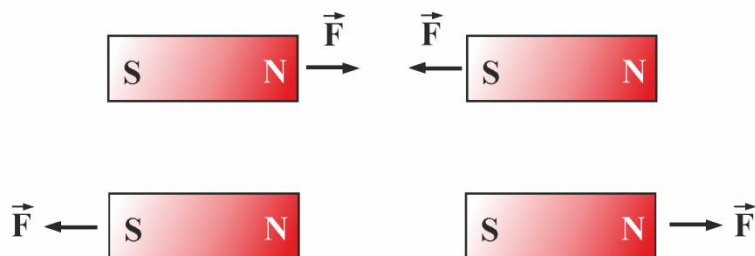
## 2 Magnetismus

Elektromagnetická teorie uvádí, že nabitý objekt vytváří elektrické pole  $\vec{E}$  ve všech bodech prostoru. Stejným způsobem je magnet zdrojem magnetického pole  $\vec{B}$ . To lze snadno prokázat pohybem kompasu blízko magnetu. Střelka kompasu se bude vyrovnávat ve směru magnetického pole vytvářeného magnetem a bude směřovat vždy k severnímu pólu (N), jak je znázorněno na obrázku 1.



**Obrázek 1:** Magnetické pole vytvořené magnetem [3]

Magnet se skládá ze dvou pólů, které jsou označeny jako sever (N) a jih (S). Linie magnetického pole opouštějí severní pól a vstupují do jižního pólu. Při držení dvou tyčových magnetů blízko sebe se podobné póly vzájemně odpuzují, zatímco opačné póly se přitahují), jak je znázorněno na obrázku 2.



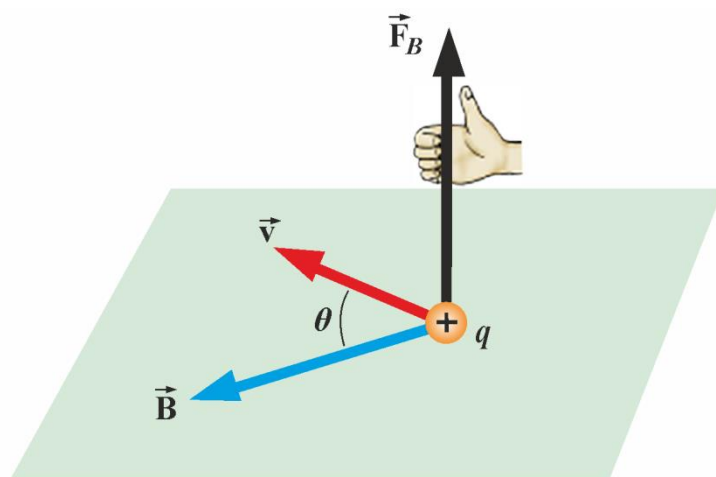
**Obrázek 2:** Přitažlivé a odpudivé síly dvou magnetů [3]

Na rozdíl od elektrických nábojů, které lze separovat, se oba magnetické póly vždy vyskytují ve dvojici. Při mechanickém rozdělení magnetů se získají dva nové magnety, každý se severním pólem a jižním pólem. Magnetické monopóly neexistují.

## 2.1 Magnetické pole

Magnetické pole lze definovat pomocí částice o náboji  $q$ , která se pohybuje rychlostí  $\vec{v}$ , na základě následujících experimentálních zjištění:

1. Velikost magnetické síly  $\vec{F}_B$ , působící na nabitou částici, je úměrná vektoru rychlosti  $\vec{v}$ , tak magnetické indukci  $\vec{B}$ .
2. Směr síly  $\vec{F}_B$  závisí také na vektorech rychlosti  $\vec{v}$  a magnetické indukce  $\vec{B}$ .
3. Magnetická síla  $\vec{F}_B$  je nulová, když je vektor rychlosti  $\vec{v}$  rovnoběžný s vektorem magnetické indukce  $\vec{B}$ .
4. Výsledný směr magnetické síly  $\vec{F}_B$  je kolmý k rovině tvořené vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  a její velikost je úměrná sinu úhlu  $\theta$ .
5. Když se znaménko náboje částice změní z pozitivního na negativní nebo naopak, směr magnetické síly se také změní.



Obrázek 3: Směr magnetické síly [3]

Výše uvedené pozorování lze shrnout pomocí následující rovnice:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Výše uvedený výraz lze považovat za definici magnetického pole v bodě v prostoru.

Velikost  $\vec{F}_B$  je dána hodnotou:

$$F_B = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin\theta \quad (2)$$

SI jednotka magnetického pole je tesla (T):

$$1 \text{ tesla} = 1T = 1 \frac{\text{Newton}}{\text{Coulomb} \cdot \frac{\text{metr}}{\text{sekunda}}} = 1 \frac{N}{C \cdot \frac{m}{s}} = 1 \frac{N}{A \cdot m} \quad (3)$$

Síla  $\vec{F}_B$  je vždy kolmá na vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  a nemůže měnit rychlost částice  $\vec{v}$ , tedy kinetickou energii částice. Jinými slovy, magnetická síla  $\vec{F}_B$  nemůže urychlit nebo zpomalit nabitou částici. V důsledku toho síla  $\vec{F}_B$  nevykonává práci:

$$dW = \vec{F}_B \cdot d\vec{s} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} dt = q(\vec{v} \times \vec{v}) \cdot \vec{B} dt = 0 \quad (4)$$

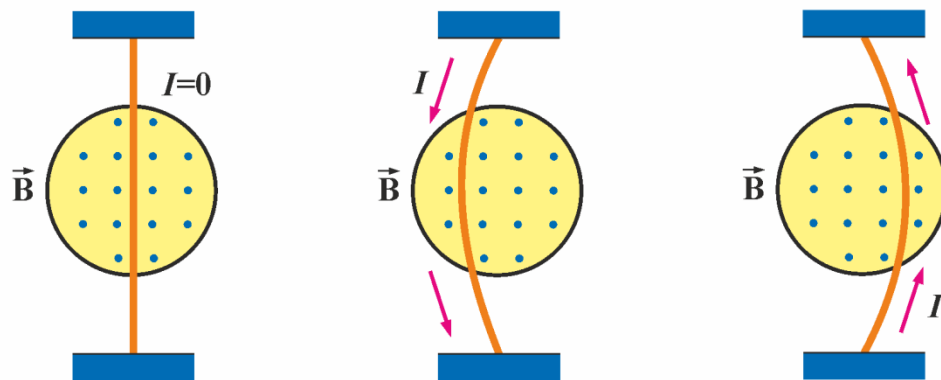
Směr vektoru  $\vec{v}$  však může být změněn magnetickou silou.

## 2.2 Magnetická síla působící na vodič

Bylo zjištěno, že na nabitou částici, která se pohybuje v magnetickém poli, působí Lorenzova síla  $\vec{F}_B$ . Protože elektrický proud se skládá z nabitých částic, které jsou v pohybu, tak umístíme-li vodič do magnetického pole, bude také na něj působit magnetická síla.

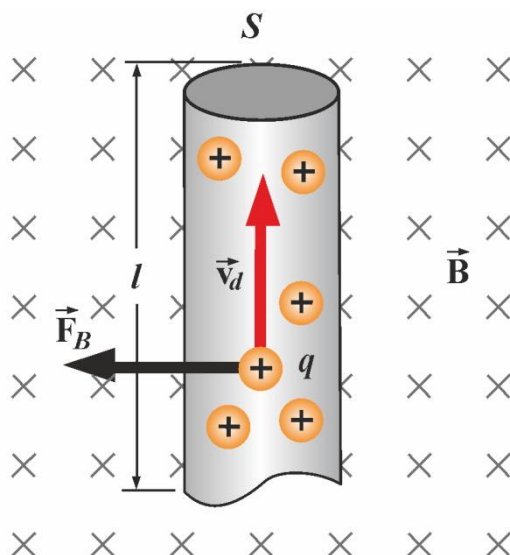
Uvažujeme, že bude dlouhý přímý vodič zavěšený v magnetickém poli. Magnetické pole je pro zjednodušení znázorněné tečkami (•) a jde směrem ze stránky. Lze snadno dokázat, že při směru proudu ve vodiči z bodu A do bodu B je vodič vychýlen doleva, ale při směru proudu ve vodiči z bodu B do bodu A je vodič vychýlen doprava, jak je znázorněno na obrázku 4.





**Obrázek 4:** Prohnutí drátu s protékajícím proudem v magnetickém poli [3]

K výpočtu síly působící na vodič je dán segment drátu o délce  $l$  a průměru  $S$ , jak je znázorněno na obrázku 5.



**Obrázek 5:** Magnetická síla působící na vodič [3]

Magnetické pole  $\vec{B}$  působí směrem kolmo k vodiči a je znázorněno křížky (X).

Náboje se pohybují průměrnou driftovou rychlostí  $\vec{v}_d$ . Jelikož celkové množství náboje v tomto segmentu je  $Q = q(nSl)$ , kde  $n$  je počet nábojů na jednotku objemu, tak celková magnetická síla působící na část vodiče je:

$$\vec{F}_B = Q\vec{v}_d \times \vec{B} = qnSl(\vec{v}_d \times \vec{B}) = I(\vec{l} \times \vec{B}), \quad (5)$$

kde  $I = nqv_dS$ , a  $\vec{l}$  je vektor délky o velikosti  $l$  a je ve směru elektrického proudu.

U drátu libovolného tvaru lze magnetickou sílu vyjádřit součtem sil působícími na malé segmenty, které tvoří drát. Diferenciální segment označíme jako  $d\vec{s}$ , pak magnetická síla působící na segment je:

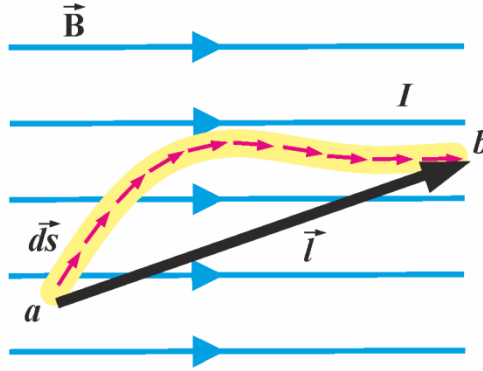
$$d\vec{F}_B = I d\vec{s} \times \vec{B}. \quad (6)$$

Celková síla je tedy:

$$\vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B}, \quad (7)$$

kde hodnoty  $a$  a  $b$  představují koncové body drátu.

Uvažujme zakřivený drát, kterým protéká proud  $I$  v homogenním magnetickém poli  $\vec{B}$ , jako je znázorněno na obrázku 6.



**Obrázek 6:** Zakřivený drát v magnetickém poli [3]

Použitím předešlé rovnice, je magnetická síla působící na drát dána:

$$\vec{F}_B = I \left( \int_a^b d\vec{s} \right) \times \vec{B} = I \vec{l} \times \vec{B}, \quad (8)$$

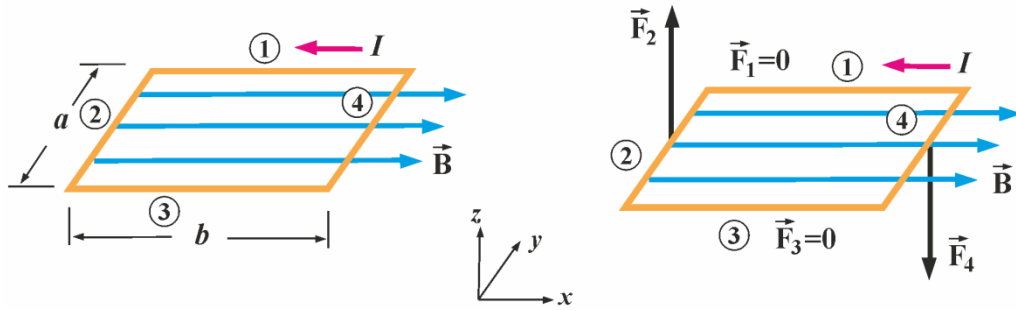
kde  $\vec{l}$  je vektor délky směřující od  $a$  do  $b$ . Pokud však drát tvoří uzavřenou smyčku libovolného tvaru, pak na smyčku působí síla:

$$\vec{F}_B = I \left( \oint d\vec{s} \right) \times \vec{B} \quad (9)$$

Jelikož množina prvků diferenciální délky  $d\vec{s}$  tvoří uzavřený polygon a jejich vektorový součet je nulový ( $\oint d\vec{s} = 0$ ), tak magnetická síla na uzavřené smyčce je nulová, takže  $\vec{F}_B = \vec{0}$ .

## 2.3 Moment na proudové smyčce

Uvažujeme, že je obdélníková proudová smyčka vložena do magnetického pole  $\vec{B} = B\hat{i}$  (viz obrázek 7), z kterého je patrné, že magnetická síla působící na strany 1 a 3 je nulová, protože vektory  $\vec{l}_1 = -b\hat{i}$  a  $\vec{l}_3 = b\hat{i}$  jsou rovnoběžné s vektory magnetické indukce  $\vec{B}$ .



**Obrázek 7:** Proudová smyčka umístěná v homogením magnetickém poli [3]

Zatímco na stranách 2 a 4 působí magnetická síla  $\vec{F}_2$  a  $\vec{F}_4$ , která se rovná:

$$\vec{F}_2 = I(-a\hat{j}) \times (B\hat{i}) = IaB\hat{k} \quad (10)$$

$$\vec{F}_4 = I(a\hat{j}) \times (B\hat{i}) = -IaB\hat{k} \quad (11)$$

Kde  $\hat{k}$  znázorňuje kladný a záporný směr kolmý k ploše. Z toho vyplývá, že síla  $\vec{F}_2$  má opačný směr než síla  $\vec{F}_4$ .

Výsledná síla na obdélníkové proudové smyčce se rovná:

$$\vec{F}_{\text{vys}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 = \vec{0} \quad (12)$$

Když výsledná síla na smyčce je nulová, síly  $\vec{F}_2$  a  $\vec{F}_4$  vytvoří točivý moment, který způsobí, že smyčka se bude otáčet kolem osy. Točivý moment vztažený ke středu smyčky se rovná:

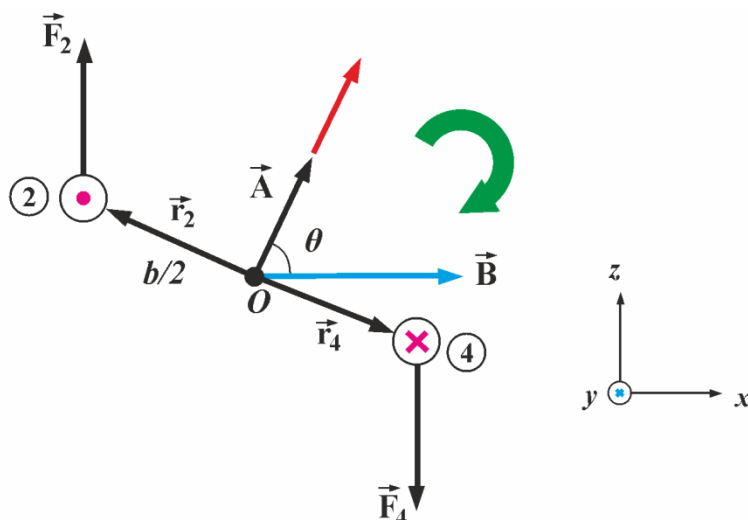
$$\begin{aligned} \vec{M} &= \left(-\frac{b}{2}\hat{i}\right) \times \vec{F}_2 + \left(\frac{b}{2}\hat{i}\right) \times \vec{F}_4 = \left(-\frac{b}{2}\hat{i}\right) \times (IaB\hat{k}) + \left(\frac{b}{2}\hat{i}\right) \times (-IaB\hat{k}) \\ &= \left(\frac{IabB}{2} + \frac{IabB}{2}\right)\hat{j} = IAB\hat{j} \end{aligned} \quad (13)$$

Kde  $S = ab$  představuje plochu smyčky. Kladná orientace označuje rotaci ve směru hodinových ručiček kolem osy y.

Je vhodné zavést oblast vektoru  $\vec{A} = S\hat{n}$ , kde  $\hat{n}$  je jednotkový vektor ve směru normály k rovině smyčky. Kladný směr  $\hat{n}$  určíme pomocí pravidla pravé ruky. Výše zmíněný výraz pro točivý moment pak může být popsán:

$$\vec{D} = I\vec{A} \times \vec{B} \quad (14)$$

Maximální točivý moment vznikne, když vektor  $\vec{B}$  je rovnoběžný se smyčkou nebo když je kolmý na vektor  $\vec{A}$ .



**Obrázek 8:** Pootočená proudová smyčka o úhel  $\theta$  [3]

Podle obrázku 8 je stanoveno rameno smyčky jako:

$$\vec{r}_2 = \frac{b}{2}(-\sin\theta\hat{i} + \cos\theta\hat{k}) = -\vec{r}_4 \quad (15)$$

Kdy výsledný točivý magnetický moment dvojce sil je:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \vec{r}_2 \times \vec{F}_2 + \vec{r}_4 \times \vec{F}_4 = 2\vec{r}_2 \times \vec{F}_2 = 2 \cdot \frac{b}{2}(-\sin\theta\hat{i} + \cos\theta\hat{k}) \times (IaB\hat{k}) \\ &= IabB\sin\theta\hat{j} = I\vec{S} \times \vec{B} \end{aligned} \quad (16)$$

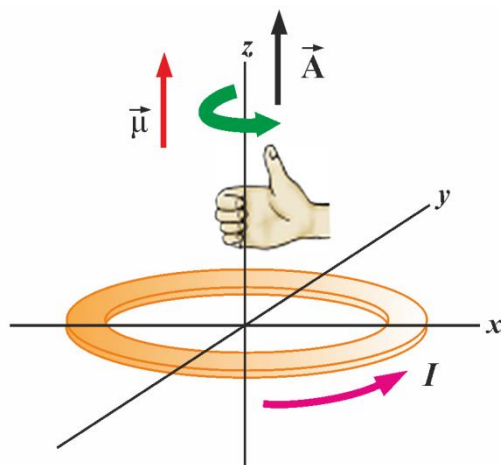
Pro smyčku s N počtem závitů, je výsledný moment:

$$D = NISB\sin\theta \quad (17)$$

Součin NIS se nazývá dipólový moment a značí se  $\mu$ .

$$\vec{\mu} = NI\vec{S} \quad (18)$$

Směr vektoru dipólového momentu  $\vec{\mu}$  je stejný jako směr plošného vektoru  $\vec{S}$ , neboli kolmý k rovině smyčky. Určuje se pomocí pravidla pravé ruky (viz obrázek 9).



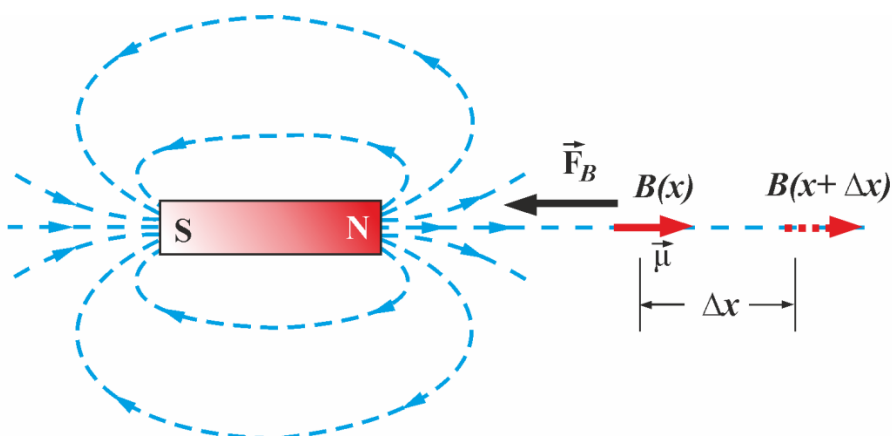
**Obrázek 9:** Pravidlo pravé ruky [3]

SI jednotka pro magnetický dipól je  $\text{Am}^2$  (ampér na metr čtverečný). Výsledný moment dvojice sil je uveden ve tvaru:

$$\vec{D} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (19)$$

## 2.4 Magnetická síla působící na dipól

Uvažujeme-li, že vedle magnetu je umístěn malý dipól, jak je znázorněno na obrázku 10, pak je dipól přitahovaný magnetem.



**Obrázek 10:** Magnetický dipól v blízkosti magnetu [3]

Musí být použita vnější síla k posunu dipólu doprava. Velikost síly vyvíjené vnějším prostředím k posunutí dipólu o vzdálenost  $\Delta x$  je dána vztahem:

$$\begin{aligned} F_{\text{vnější}} \cdot \Delta x &= W_{\text{vnější}} = \Delta E = -\mu B(x + \Delta x) + \mu B(x) \\ &= -\mu[B(x + \Delta x) - B(x)] \end{aligned} \quad (20)$$

U malého posunutí  $\Delta x$ , lze získat sílu:

$$F_{\text{vnější}} = -\mu \frac{[B(x + \Delta x) - B(x)]}{\Delta x} = -\mu \frac{dB}{dx} \quad (21)$$

Vnější síla je kladná, když  $\frac{dB}{dx} < 0$ , a intenzita mag. pole klesá s rostoucí vzdáleností.

Síla potřebná k překonání magnetické síly se rovná:

$$F = \mu \frac{dB}{dx} = \frac{d}{dx}(\vec{\mu} \cdot \vec{B}) \quad (22)$$

Pro obecnou magnetickou sílu působící na dipól, který je umístěn v nehomogenním magnetickém poli, platí:

$$\vec{F}_B = \nabla(\vec{\mu} \cdot \vec{B}), \quad (23)$$

kde  $\nabla$  je gradient, definován takto:

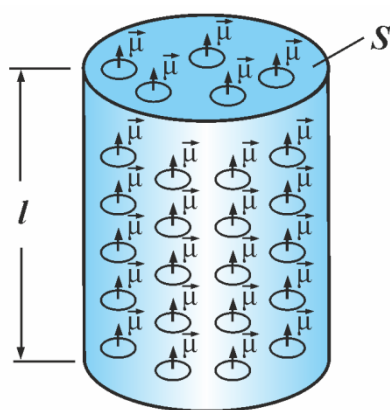
$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (24)$$

### 3 Rozdělení látek podle magnetických vlastností

Látky se dělí do tří základních skupin podle magnetické susceptibility nebo podle relativní permeability na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické.

#### 3.1 Struktura magnetických látek

Materiály se skládají z mnoha trvalých nebo indukovaných magnetických dipólů. Pro zjednodušení, je uvažováno, že máme materiál ve tvaru válce o ploše  $S$ , výšce  $l$  a skládá se z  $N$  magnetických dipólů, které mají stejnou velikost a každý s magnetickým dipólovým momentem  $\vec{\mu}$  rovnoměrně rozloženém v celém objemu válce, jak je znázorněno na obrázku 11.



**Obrázek 11:** Válec s  $N$  magnetickými dipólovými momenty [4]

Pokud je definován vektor magnetického momentu  $\vec{M}$  jako vektor momentu dvojice sil magnetického dipólu na jednotku objemu platí vztah:

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i \quad (25)$$

## 3.2 Paramagnetické látky

Atomy nebo molekuly paramagnetickém materiálu mají stálý magnetický dipólový moment. Když nejsou v magnetickém poli, tak mají dipóly rozmístěny náhodně. Výsledný moment  $\vec{M} = \vec{0}$  a výsledné magnetické pole  $\vec{B}_m$  je také nulové.

Je-li umístěn paramagnetický materiál v magnetickém poli  $\vec{B}_0$ , dipóly budou mít točivý moment  $\vec{D} = \vec{\mu} \times \vec{B}_0$ , který se bude chtít ustálit. Čímž vznikne magnetická polarizace  $\vec{M}$  rovnoběžná s vnějším magnetickým polem  $\vec{B}_0$ . Vzhledem k tomu, že pole  $\vec{B}_m$  je paralelní s polem  $\vec{B}_0$ , bude mít tendenci zvyšovat magnetickou indukci.

Celkové magnetické pole bude součtem těchto dvou polí:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} \quad (26)$$

Ve většině paramagnetických látek působí magnetizace  $\vec{M}$  ve stejném směru jako vnější magnetické pole  $\vec{B}_0$  a jsou spolu přímo úměrné:

$$\vec{M} = \chi_m \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}, \quad (27)$$

kde  $\chi_m$  je magnetická susceptibilita.

Potom lze popsat magnetické pole:

$$\vec{B} = (1 + \chi_m) \vec{B}_0 = \mu_m \vec{B}_0, \quad (28)$$

kde  $\mu_m = (1 + \chi_m)$  a nazývá se relativní permeabilitou.

Pro paramagnetické látky platí  $\mu_m > 1$ , nebo  $\chi_m > 0$ , kde jsou obvyklé hodnoty  $\chi_m$  v řádu  $10^{-3}$  až  $10^{-6}$ . Magnetická permeabilita materiálu  $\mu$  může být také definována:

$$\mu = (1 + \chi_m) \mu_0 = \mu_m \mu_0 \quad (29)$$

Paramagnetický materiál má  $\mu_m > \mu_0$ .

### 3.2.1 Příklady paramagnetických látek

Mezi paramagnetické látky patří prvky: hliník, baryum, vápník, mangan, kyslík, platina, sodík, uran, hořčík a další. Taky mezi paramagnetické látky patří sloučeniny jako je síran měďnatý, chlorid železitý, oxid železitý a chlorid manganistý.



### 3.3 Diamagnetické látky

Na rozdíl od paramagnetických látek nemají diamagnetické látky stálý magnetický dipólový moment. Je-li diamagnetická látka vložena do vnějšího magnetického pole  $\vec{B}_0$ , naindukuje se magnetický dipólový moment v atomech nebo v molekulách.

Toto indukované magnetické dipólové pole je v opačném směru k vnějšímu magnetickému poli  $\vec{B}_0$ , což vede k magnetizaci  $\vec{M}$  a k magnetickému poli  $\vec{B}_m$ , proti směru  $\vec{B}_0$ , tím dochází ke snížení intenzity magnetického pole.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 - \vec{B}_m = \vec{B}_0 - \mu_0 \vec{M} \quad (30)$$

Pro diamagnetické látky lze definovat magnetickou permeabilitu, jako u paramagnetických látek, které na rozdíl od nich mají  $\mu_m < 1$ , nebo  $\chi_m < 0$ . Kde jsou obvyklé hodnoty magnetické susceptibility  $\chi_m$  jsou v řádech  $10^{-5}$  až  $10^{-9}$ .

Diamagnetický materiál má permeabilitu menší než permeabilitu vakua ( $\mu_m < \mu_0$ ).

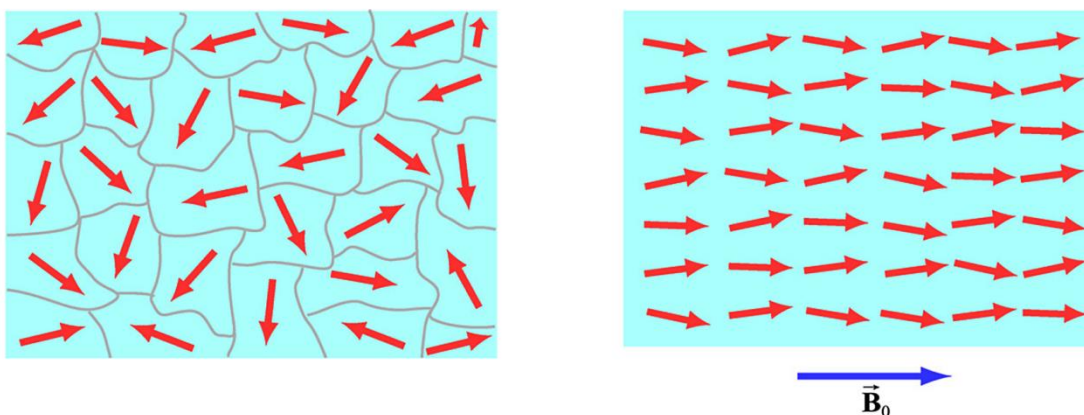
#### 3.3.1 Příklady diamagnetických látek

Mezi diamagnetické látky patří např. inertní plyny, voda, dále prvky jako jsou: zlato, měď, rtuť, bismut, síra a uhlík.

### 3.4 Feromagnetické látky

Ve feromagnetických látkách existuje silná interakce mezi sousedními atomovými dipólovými momenty.

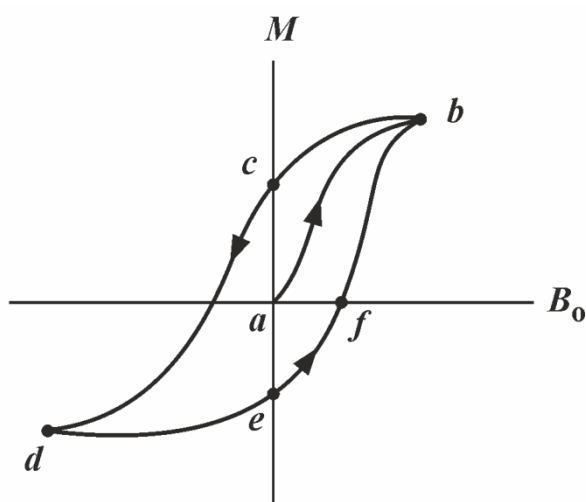
Feromagnetické materiály jsou tvořeny malými částmi nazývanými domény, jak je znázorněno na obrázku 12. Vnější magnetické pole  $\vec{B}_0$  má sklon směřovat tyto magnetické dipóly souběžně se svým polem, jak je znázorněno na obrázku 12. Silná interakce mezi sousedními momenty atomového dipólu způsobuje mnohem silnější vyrovnání magnetických dipólů než u paramagnetických materiálů.



**Obrázek 12:** Feromagnetické domény [4]

Magnetické pole, uvnitř feromagnetické látky, může dosahovat  $10^3$  až  $10^4$  vyšších hodnot než vnější magnetické pole  $\vec{B}_0$ . Permeabilita  $\mu_m$  feromagnetického materiálu není konstantní, neboť celkové magnetické pole  $\vec{B}$  ani magnetizace  $\vec{M}$  nejsou lineárně závislé na vnějším magnetickém poli  $\vec{B}_0$ . Ve skutečnosti vztah mezi magnetizací  $\vec{M}$  a intenzitou vnějšího magnetického pole není konstantní, ale závisí na předchozím stavu feromagnetické látky. Tento jev se nazývá hystereze.

Vztah mezi magnetizací  $\vec{M}$  a vnějším magnetickým polem  $\vec{B}_0$ , je znázorněn na obrázku 13.



**Obrázek 13:** Hysterezní smyčka [4]

Navíc u feromagnetických látek může silná interakce mezi sousedními momenty atomového dipólu udržovat tyto dipólové momenty zarovnané ve stejném směru, a to dokonce, i když na něj nepůsobí magnetická síla. Takto seřazené dipóly mohou vytvářet silné magnetické pole samy o sobě, bez nutnosti vnějšího magnetického pole. Na tomto principu fungují permanentní magnety, které dosahují magnetizace  $10^6 \text{ Am}^{-1}$ .

### 3.4.1 Příklady feromagnetických látek

Mezi feromagnetické látky patří např. železo, nikl, kobalt, gadolinium, ruthenium a dále slitiny s železem.

## 3.5 Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou látky, které při zmagnetizování vytvoří vlastní magnetické pole. Převážná část permanentních magnetů je tvořena ze vzácných zemin, které se v přírodě vyskytují ve formě minerálů. Jsou tvořeny z tvrdých feromagnetických látek.

Permanentní magnety můžeme rozdělit na keramické magnety, feritové magnety, alnico magnety, samarium-kobaltové magnety, neodymové magnety a další.

### 3.5.1 Neodymový magnet

Neodymový magnet je slitina tří prvků. Z neodymu, železa a bóru, které tvoří sloučeninu  $Nd_2Fe_{14}B$ .

Výhodou neodymových magnetů je, že jsou několikanásobně silnější než feritové magnety, alnico magnety.

Využití neodymových magnetů je v elektronice, zejména v hlavicích pevných disků, dále v reproduktorech a mikrofonech.

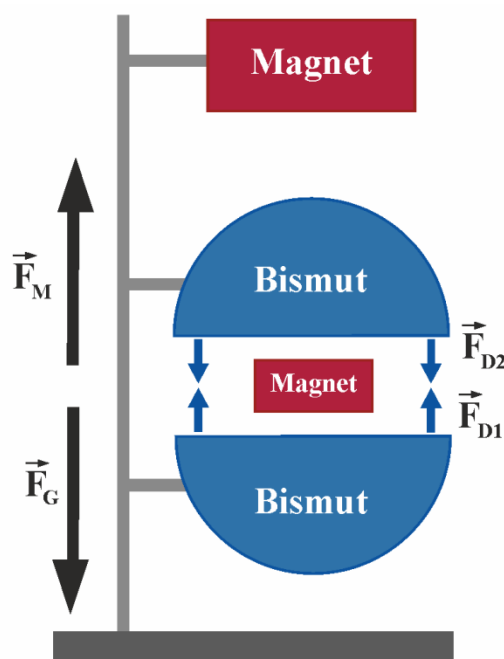
Nevýhodou neodymových magnetů je, že ztrácejí magnetické vlastnosti od  $80^\circ\text{C}$ , dále velmi rychle korodují a je potřeba na nich vytvořit povrchovou úpravu.

Při rešerši byla využita zejména literatura [1],[2],[3] a [4].

## 4 Návrh modelu

Při návrhu modelu k demonstračnímu experimentu k dokázání diamagnetické síly bylo vycházeno ze znalostí magnetismu a diamagnetických látek.

Na základě této teorie byl navržen model (viz obrázek 14), který je doplněn o síly, které působí na levitující magnet.



**Obrázek 14:** Navrhovaný model

Navrhovaný model se bude skládat ze dvou částí bismutu, jak je znázorněno na obrázku 14 modře. Mezi bismutem bude levitovat magnet (znázorněný červeně) na který působí dvě diamagnetické síly. První diamagnetická síla  $F_{D1}$  z bismutu pod levitujícím magnetem, která nazvedává magnet, aby levitoval. Druhá diamagnetická síla  $F_{D2}$  z bismutu nad magnetem která působí opačným směrem, než první diamagnetická síla, pomáhá vycentrovat magnet mezi bismutem.

Magnet připevněný nad bismutem a levitujícím magnetem, by se využil jenom v případě, že diamagnetická síla  $F_{D1}$  nebude větší než tíhová síla  $F_G$ . V tom případě na levitující magnet působila ještě magnetická síla  $F_M$ , která pomáhala vyrovnat tíhovou sílu  $F_G$ .

### 4.1.1 Výběr magnetu

Při výběru magnetu bylo k dispozici několik možností. Např. feritové magnety, které mají poměrně nízkou cenu, ale nemají tak velkou magnetickou sílu jako ostatní typy magnetů. Dále je možno zvolit alnico magnety, u kterých je hlavní výhoda, že vydrží vysoké teploty. Zatím co samarium-kobaltové magnety, které taky vydrží vysoké teploty až 300 °C, ale jsou příliš drahé a nepotřebují povrchovou úpravu. Až po neodymové magnety, které mají největší magnetickou sílu, jsou drahé a při teplotách nad 80 °C se snižuje magnetická síla.

Nakonec byl zvolen neodymový magnet, který je dražší než feritový magnet, ale má větší magnetickou sílu, i když nevydrží stejně vysoké teploty jako alnico magnety nebo samarium-kobaltové magnety. U demonstračního experimentu se nepředpokládá překročení pokojové teploty, a tak není potřeba mít alnico magnety ani samarium-kobaltové magnety.



**Obrázek 15:** Neodymový magnet 5 x 5 x 5 mm [7]

## 4.2 Tvar bismutu

Pro vytvoření ideálního tvaru bismutu byl použit program SW FEMM 4.2, který pro výpočet magnetické síly používá metodu konečných prvků.

### 4.2.1 Software FEMM 4.2

FEMM 4.2 je open source program primárně určený pro řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických úloh ve dvourozměrném prostoru s danou fixní hloubkou nebo osově souměrných oblastí. V jednotlivých modulech programu se dají řešit úlohy od lineárních elektrostatických přes lineární statické, nelineární statické, lineární dynamické nelineární dynamické magnetické úlohy, až po úlohy přenosu tepla v materiálech.

Program je rozdělen do tří hlavních částí:

První část tzv. Interactive shell, který je přizpůsobený pro modelování, obsahuje podobné rozhraní, jako mají CAD programy pro vytváření geometrických úloh, pro definování okrajových podmínek a pro přiřazení materiálů z knihovny. Do knihovny se dají přidat i vlastní materiály. Modely ve formátu dxf lze pro usnadnění importovat z CAD programů, které tento formát podporují.

V druhé části se pomocí metody konečných prvků rozdělí oblast modelu na velký počet trojúhelníků s různými uzlovými potenciály.

Třetí část je pro každou úlohu rozdílná. Má vlastní sadu datových souborů, které popisují úlohu a řeší příslušné parciální diferenciální rovnice k vytvoření grafického modelu.

### 4.2.2 Vytvoření simulace

Před vytvořením simulace byly vytvořeny pomocí v programu AutoCAD Mechanical tři návrhy tvaru modulu, které byly inportovány do Interactive shell.

První byla polokoule, druhá ploskovypouklá čočka s rádiusem  $45^\circ$  a třetí byl válec. U všech tří tvarů modulu bylo počítáno s průměrem  $50\text{ mm}$ , který byl stanoven z množství bismutu, který byl k dispozici.

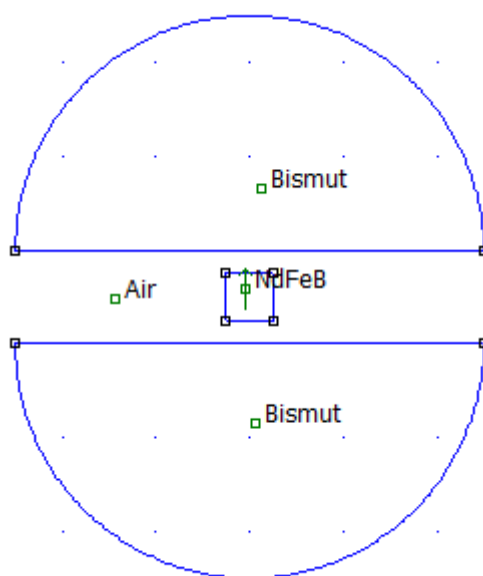
V systému FEMM 4.2 se dá vybrat mezi kartézskou a polární soustavou. Pro simulaci byla vybrána kartézská soustava, protože návrh modelu se lépe převádí z AutoCadu do FEMM 4.2 v kartézské soustavě než v polární.

Nejdříve byl nadefinován materiál, který budu používat v modelu. K tomu je využita již připravená knihovna programu, kde jsou předdefinované materiály, jako neodymový magnet N50 a vzduch pro okolní prostředí. Dále bylo nutné nadefinovat nová data pro materiál bismut. K definování nového materiálu bylo zapotřebí zadat relativní permeabilitu bismutu  $\mu_m = 0,999848 \text{ Hm}^{-1}$ .

### 4.2.3 Model s tvarem polokoule

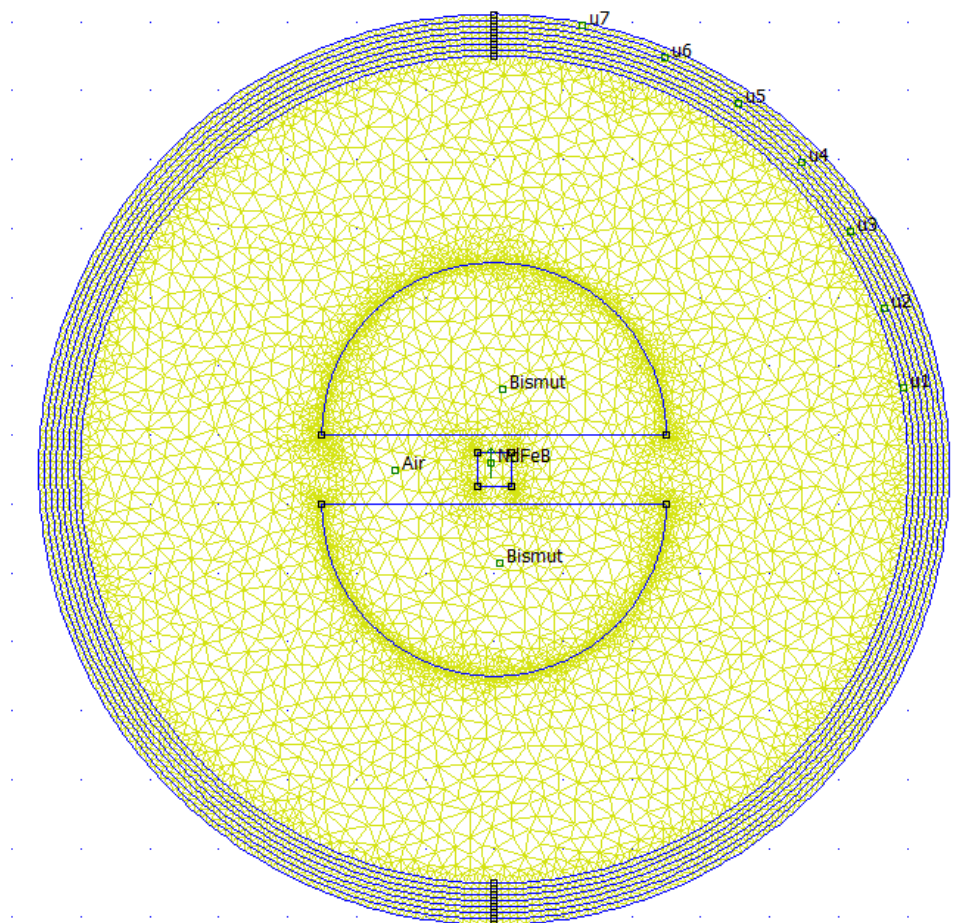
První simulace byla provedena pro model s tvarem polokoule o průměru 50 mm, který byl vytvořen pomocí programu AutoCadu spolu s modelem levitujícího magnetu ve tvaru čtverce a velikosti 5 x 5 mm.

V programu FEMM 4.2 byl doplněn materiál skládající se z jednotlivých částí modelu (viz obrázek 16).



**Obrázek 16:** Přenesený model z AutoCADu s definovanými materiály

Celý model byl ohraničen Dirichletovou okrajovou podmínkou s omezením velikost oblasti pro simulaci. Dále byla spuštěna simulace, kde byla nastavena maximální vzdálenost uzlových bodů od sebe na 0,1 mm. Každý uzlový bod se propojil se dvěma dalšími body a vytvořil síť trojúhelníků s vrcholy v uzlových bodech (viz obrázek 17).



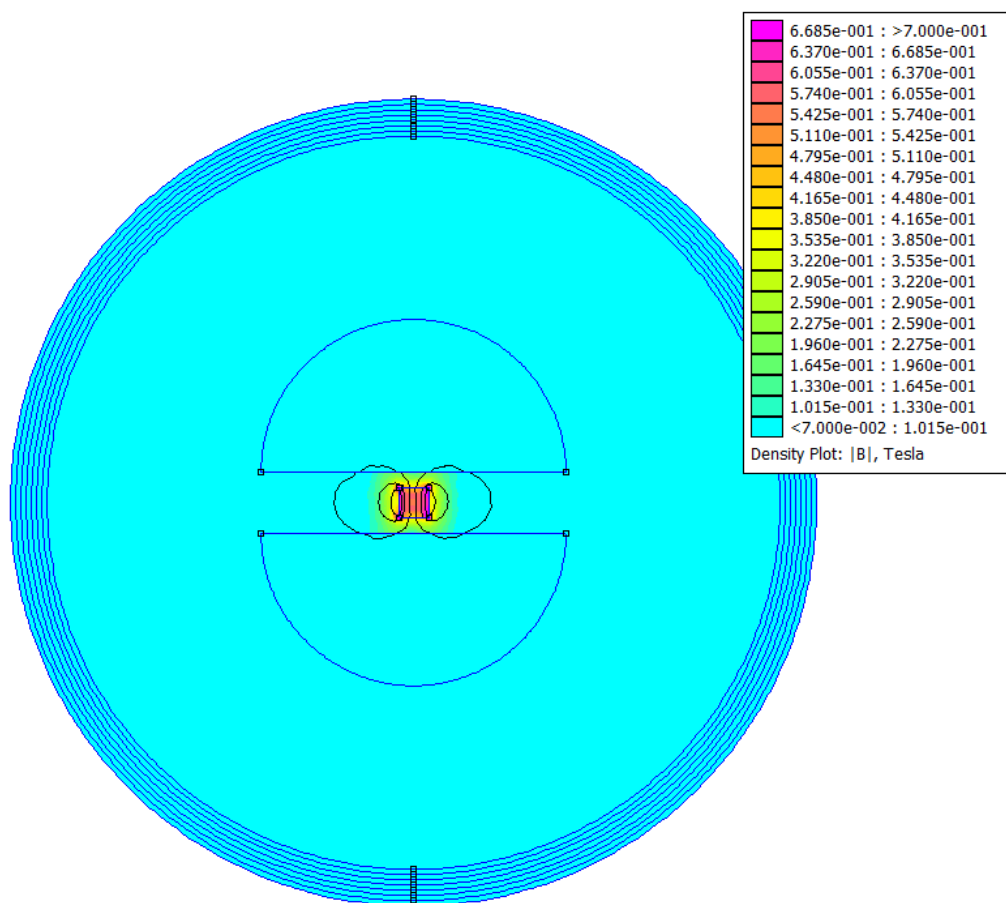
**Obrázek 17:** Zobrazení vygenerované sítě uzlových bodů

V každém uzlovém bodě se vytvoří lineární rovnice pro výpočet uzlových potenciálů.

#### **Grafické zobrazení modelu z FEMM 4.2**

Po výpočtech rovnic v uzlových bodech se vygeneruje grafický model, kde se zobrazí magnetické pole, siločáry a vypočítá magnetická síla, moment a intenzita magnetického pole.





**Obrázek 18:** Grafické zobrazení – model s tvarem polokoule

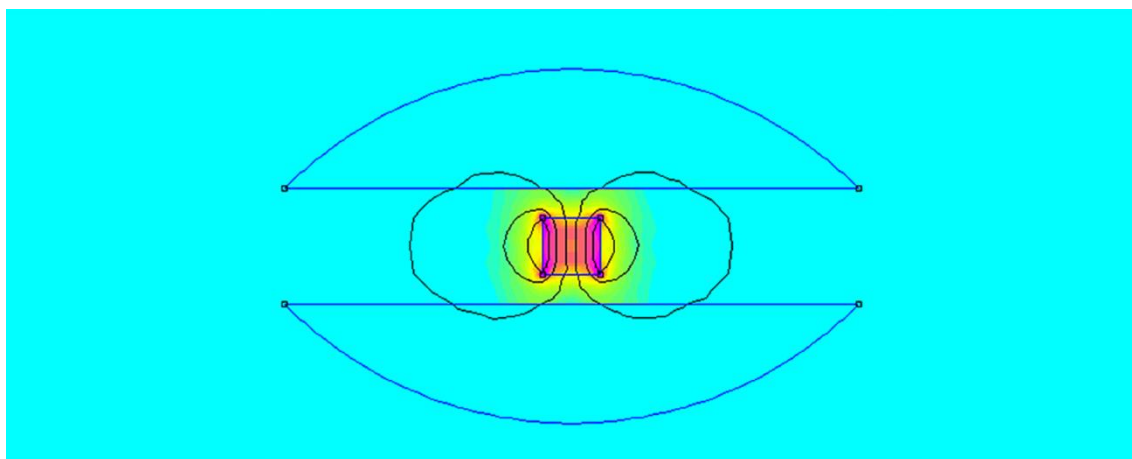
V zobrazeném grafickém modelu (viz obrázek 18) je znázorněno rozložení magnetického pole, které je od 0,7 do 0,07  $T$  a indukční čáry, které vyjadřují směr magnetické indukce. Ve znázorněném modelu je vidět, že se magnetické pole kolem magnetu deformuje ze stran od bismutu. Vypočtená odpuzivá magnetická síla, kterou působí magnet na bismut, je 9,8  $mN$ . Kromě magnetické síly se dá i vypočítat magnetické pole okolo magnetu.

#### 4.2.4 Model s tvarem ploskovypouklé čočky s rádiusem 45°

Druhá simulace pro model s tvarem ploskovypouklé čočky s rádiusem 45° stejně jako u modelu polokoule, který byla vytvořen pomocí programu AutoCadu spolu s modelem levitujícího magnetu ve tvaru čtverce a velikosti 5 x 5 mm.

Opět byl nastaven materiál jednotlivým částem modelu, dále ohraničeno Dirichletovou okrajovou podmínkou a omezena velikost oblasti. Byla spuštěna simulace a stanovena maximální vzdálenost uzlových bodů okolo bismutu a magnetu, stejně jako u modelu s polokoulí.

#### Grafické zobrazení modelu z FEMM 4.2



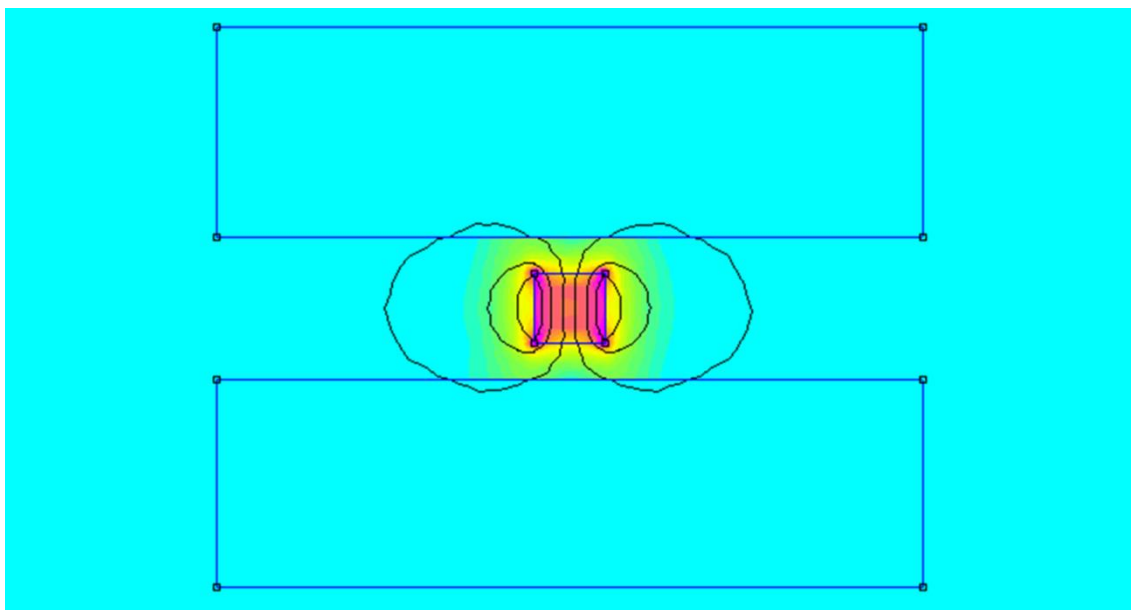
**Obrázek 19:** Grafické zobrazení – model s tvarem ploskovypouklé čočky

V zobrazeném grafickém modelu s tvarem ploskovypouklé čočky s rádiusem 45 (viz obrázek 19), kde je znázorněno rozložení magnetického pole stejné jako u modelu s polokoulí. Odpudivá magnetická síla, kterou působí magnet na bismut je 5,1 mN.

#### 4.2.5 Model s tvarem válce

Třetí simulace pro model s tvarem válce U tvaru válce o průměru 50 mm a výšce 25 mm stejně jako u modelu polokoule či ploskovypouklé čočky, který byl vytvořen pomocí programu AutoCadu spolu s modelem levitujícího magnetu ve tvaru čtverce a velikosti 5 x 5 mm.

## Grafické zobrazení modelu z FEMM 4.2



**Obrázek 20:** Grafické zobrazení – model s tvarem válce

V zobrazeném grafickém modelu (viz obrázek 20), kde je znázorněno rozložení magnetického pole stejné jako u modelu ve tvaru polokoule či ploskovypouklé čočky. Odpudivá magnetická síla, kterou působí magnet na bismut je  $11,7 \text{ mN}$ .

### 4.2.6 Vybrání nejvhodnějšího tvaru modelu

Pro vytvoření demonstračního experimentu byl možný výběr ze tří možností. A to modelu ve tvaru válce, který má největší odpudivou magnetickou sílu  $11,7 \text{ mN}$ , ale svým tvarem nedokáže centrovat magnet při levitaci. Z modelu ve tvaru polokoule, který má odpudivou magnetickou sílu  $9,8 \text{ mN}$ , ale na rozdíl od modelu ve tvaru válce dokáže centrovat magnet. A modelu ve tvaru ploskovypouklé čočky s odpudivou magnetickou silou  $5,1 \text{ mN}$ , která stejně jako polokoule dokáže centrovat magnet.

Pro demonstrační experiment byl nejvhodnější tvar modelu, který dokáže centrovat magnet. Z modelu ve tvaru polokoule a ploskovypouklé čočky byl vybrán model ve tvaru polokoule, na který působí magnet větší odpudivou magnetickou sílu.

## 5 Vytvoření modelu

Nejvhodnější způsob, jak vytvořit model z bismutu ve tvaru polokoule je pomocí technologie gravitačního lití do pískové, keramické, železné nebo sádrové formy.

Pro odlitky z bismutu bylo zvoleno gravitační technologii lití do pískové formy, která je pro jedno použití, ale je rychlejší a lacinější než ostatní formy.

Před samotným odlitím odlitku byl vytvořen model pro vytvoření formy pro odlitek.

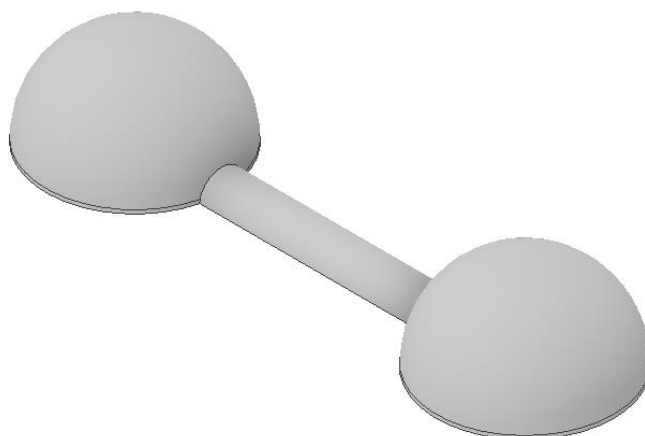
### 5.1 3D model k vytvoření formy

Model pro formu byl nakreslen v programu Autodesk Inventor ve 3D (viz obrázek 21), ze kterého lze exportovat soubor step, který se dá převést do g-kódu pro 3D tisk.

#### 5.1.1 Tvar 3D modelu

Model se skládá ze dvou polokoulí o průměru 50 mm, které jsou propojeny vtokovým kanálkem o průměru 5 mm a délce 60 mm, z důvodu technologie lití (viz obrázek 21).

Výhoda modelu s propojenými polokoulemi je, že se obě dvě polokoule odlitku, které jsou určeny k demonstračnímu modelu, lijí najednou a nedochází ke ztrátě a znečištění bismutu při odlévání do dvou samostatných forem.

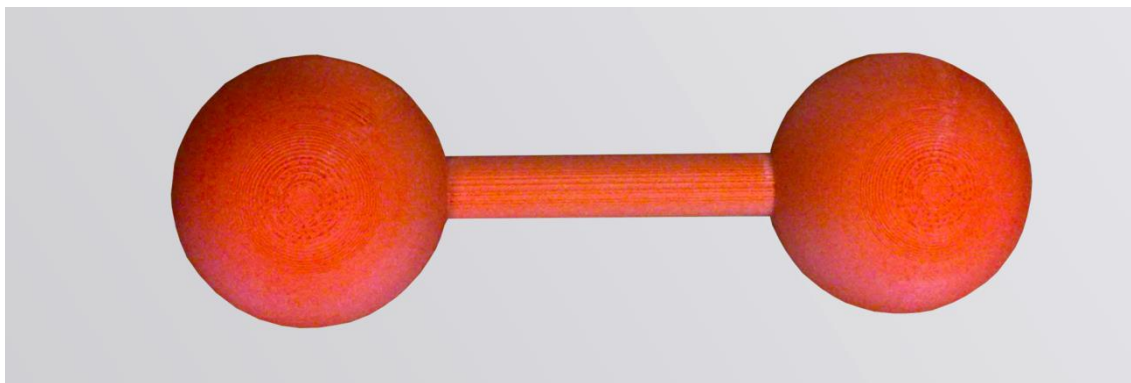


**Obrázek 21:** Navrhnutý 3D model

### 5.1.2 Tisk 3D modelu

Navržený 3D model je převeden pomocí tiskového softwaru do g-kódu. V g-kódu jsou uvedeny souřadnice modelu, informace o množství materiálu potřebného k vytisknutí modelu a teplota podložky a trysky.

Model byl vytisknut ve 3D tiskárně Dimension SST 768 z materiálu ABS – b400 (viz obrázek 22).



**Obrázek 22:** Vytisknutý 3D model

## 5.2 Písková forma

Nejvhodnější forma pro odlití odlitku modelu je písková forma, protože je lacinější než ocelová nebo keramická forma a rychleji se vyrobí.

Písková forma se vyrábí z pískové formátovací směsi, která se skládá z ostřiva a pojiva.

### Ostřivo

Ostřivo je nosná část a je tvořena převážně z  $\text{SiO}_2$  - oxidu křemičitého, dále se do ostřiva přidávají další látky, například pro rychlejší odvod tepla, rychlejší vytvrzení formy, zvýšení prodyšnosti formy a odolnosti proti zapékání.

Kromě oxidu křemičitého se používá šamot, korund, zirkon, magnezit a další látky.

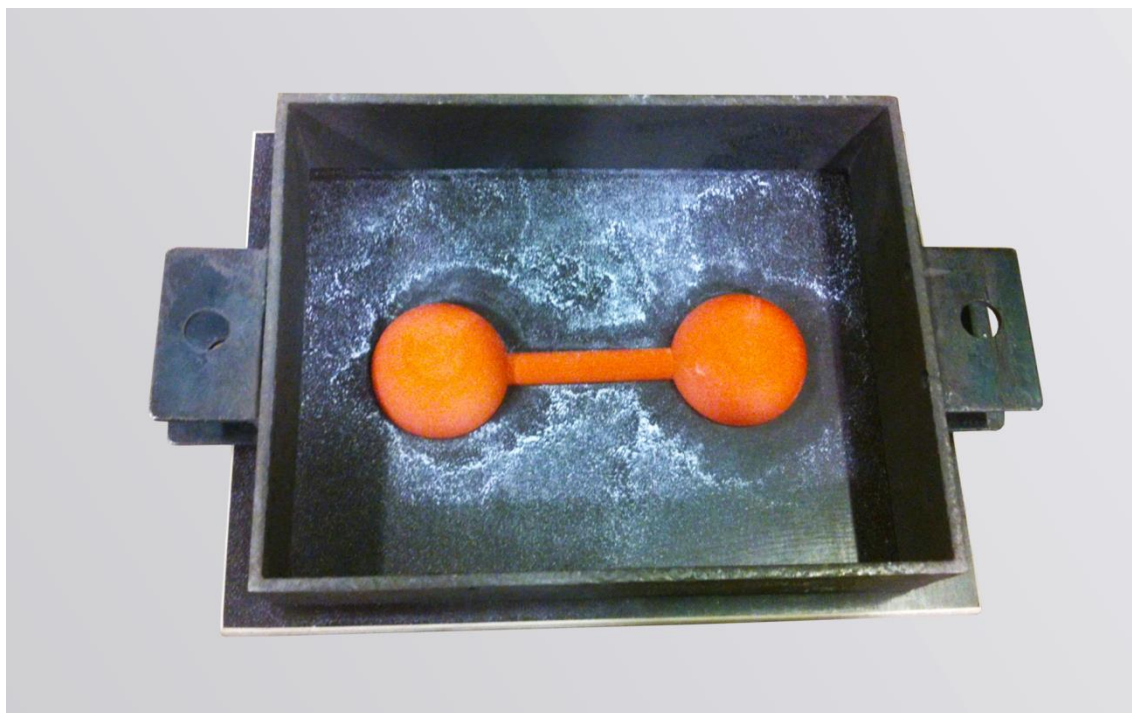
### Pojivo

Pojivo slouží ke spojování zrněk ostřiva a dělí se na organické a anorganické. Mezi organická pojiva patří pryskyřice, tuky, oleje a sacharidy a mezi anorganická pojiva patří hlína na bázi jílu, vodní sklo, sádra a cement.

### 5.2.1 Vytvoření pískové formy

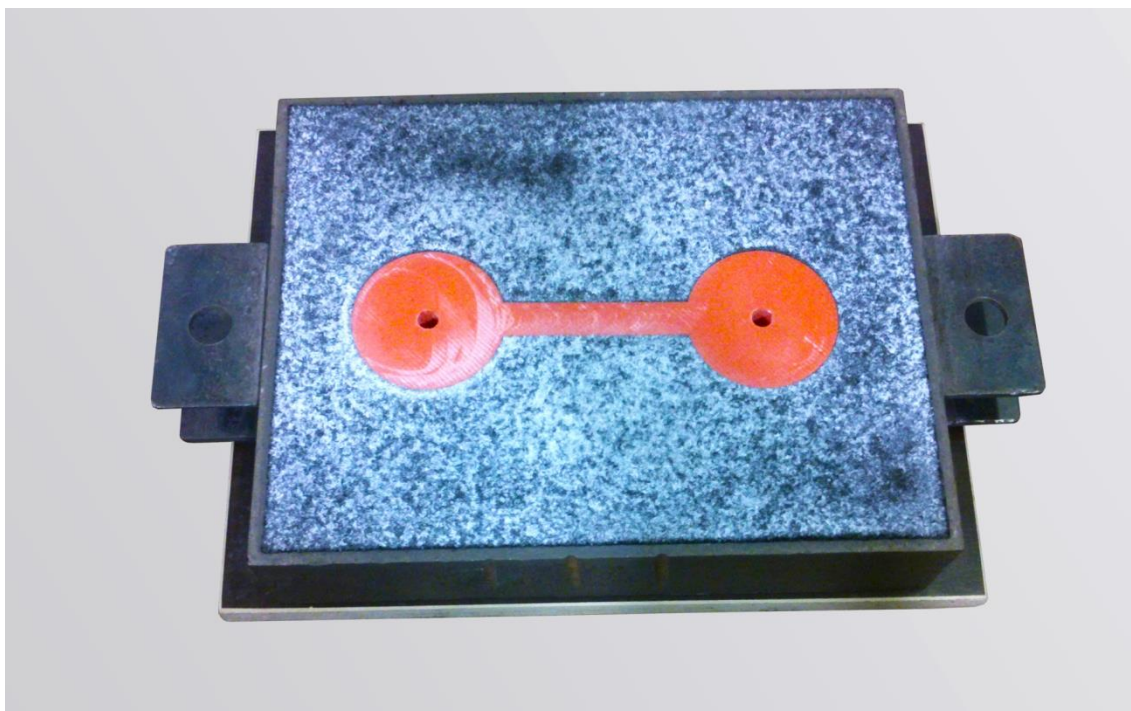
Pro odlití odlitku z bismutu byla použita dvojdílná písková forma. Před vytvořením pískové formy byla připravena písková formátovací směs z ostřiva, které je z křemičitého písku s pojivem na bázi jílu. Ostřivo s pojivem za pomoci vody bylo smícháno v mísiči pro přípravu formátovací směsi.

Na formovací desku byla položena horní část formovacího rámu a 3D model, který byl posypán uhličitánem hořečnatým, aby se 3D model nepřilepil k formě a při jeho vyndání se neporušil tvar formy odlitku (viz obrázek 23).



**Obrázek 23:** Příprava formy

Do rámu formy byla nasypána písková formátovací směs přes síto a upěchována k 3D modelu, zbývající prostor v rámu formy byl rovněž vyplněn formátovací směsí a upěchován. Forma pro odlitek byla opatřena odvzdušňovacími průduchy. Pro další postup při zhotovení formy byla horní část formy otočena o 180° (viz obrázek 24).



**Obrázek 24:** Horní část pískové formy

Horní a spodní část pískové formy v oblasti dělicí roviny byly posypány uhličitanem hořečnatým, aby se obě části pískové formy nespojily. Pomocí závěrných kolíků pak byly obě části pískové formy spojeny a zajištěny. Stejně jako u horní části pískové formy byla i spodní část formy vyplněna formátovací směsí a upěchována. Spodní část pískové formy byla opatřena odvzdušňovacími průduchy a zároveň byl v horní části pískové formy vytvořen vtokový otvor pomocí kolíku (viz obrázek 25).





**Obrázek 25:** Vytvořený vtok do pískové formy

Před vysušením pískové formy v peci byl vyjmut 3D model z formy tj. písková forma byla v dělicí rovině rozdělena na části a 3D model opatrně vyjmut a forma byla opět pomocí kolíku spojena a zajištěna.

### 5.3 Odlití odlitku

Pro odlití modelu byla vybrána metoda gravitační lití, protože se při ní spotřebuje méně materiálu než u metody tlakového lití. Pro odlití bismutu je gravitační lití lepší než odstředivé lití.

Bismut byl vložen do keramického kelímku, který se umístil do předehřáté tavící pece na teplotu 280 °C. Během tavení byl bismut průběžně kontrolován, než se roztavil. Dále byla kontrolována teplota tání, aby nebyla překročena o 20 °C a tak nevznikly oxidy bismutu a další sloučeniny.

Než se bismut roztavil, byla přichystána a zatížena vysušená písková forma, aby při odlévání nedošlo ke vztlaku bismutu.

Roztavený bismut byl odlit do připravené pískové formy (viz obrázek 26).





**Obrázek 26:** Lití bismutu do pískové formy

Po vychladnutí bismutu a pískové formy byla forma rozdělena, dále následovalo vyjmutí odlitku a jeho očištění od formátovací směsi (viz obrázek 27).



**Obrázek 27:** Odlitek z bismutu

## 5.4 Zbroušení odlitku

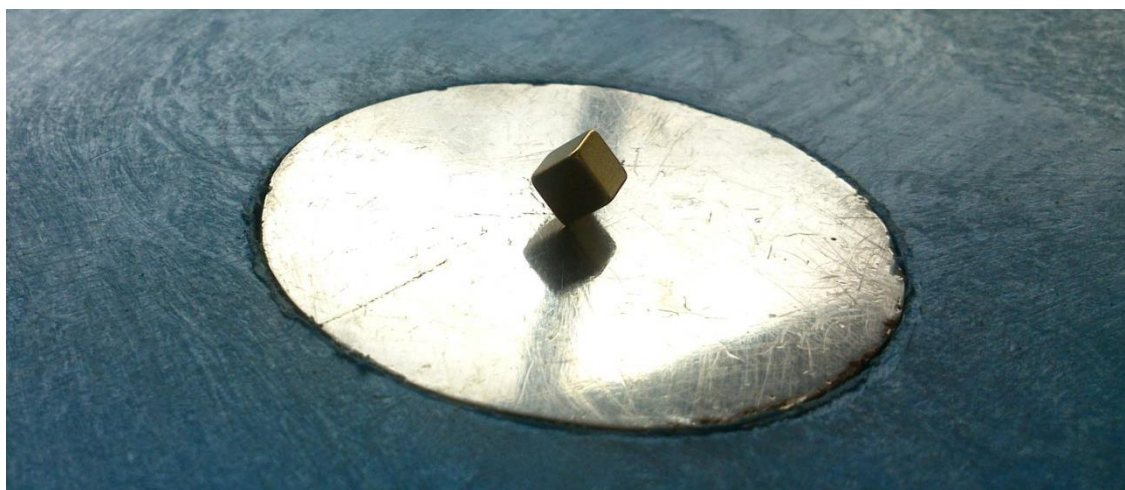
Z odlitku z bismutu byla odstraněna vtoková soustava pomocí pásové pily a tyto hrany byly zabroušeny pilníkem. Rovná plocha odlitku ve tvaru polokoule byla zabroušena pilníkem posléze brusným papírem a vyleštěna pomocí leštící pasty na kov (viz obrázek 28).



**Obrázek 28:** Vyleštěný odlitek ve tvaru polokoule z bismutu

## 6 Sestavení demonstračního modelu

Před sestavením samotného demonstračního modelu byla vyzkoušena velikost diamagnetické síly na odlitém bismutovém odlitku ve tvaru polokoule s neodýmovým magnetem o velikosti 5 x 5 x 5 mm.



**Obrázek 29:** Demonstrace diamagnetické síly

Na obrázku 29 je vidět, že diamagnetická síla působí na magnet a nadzvedává ho, ale není větší než tíhová síla, která působí na magnet. Na základě tohoto pokusu bylo rozhodnuto pro sestavení demonstračního modelu s magnetem připevněným nad bismutovými odlitky ve tvaru polokoule a levitujícím neodýmovým magnetem.

### 6.1 Návrh 3D demonstračního modelu

Pro sestavení demonstračního modelu byl nejdříve navržen jeho 3D model pomocí programu Autodesk Inventor (viz obrázek 30).

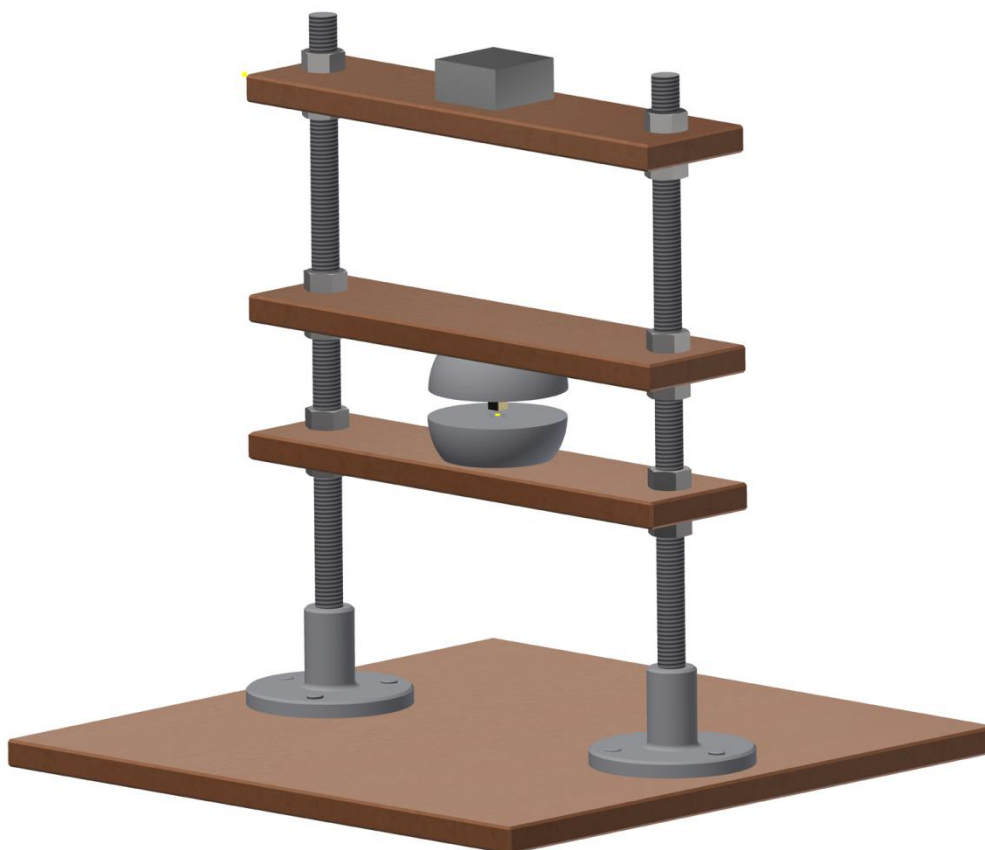
Navrhovaný 3D model se skládá ze základní desky o velikosti 250 x 250 mm o tloušťce 10 mm, pro stabilitu celého modelu. K základní desce budou přišroubovány pomocí tři šroubů s kuželovou hlavou M6x16 dva úchyty se závitem M10. Do úchytků budou našroubovány dvě závitové tyče M10, aby se dal model nastavit.

Bismutové odlitky ve tvaru polokoule budou vlepeny do desek o velikosti 200 x 50 mm o tloušťce 10 mm, které budou mít po stranách otvory pro nasazení na závitové tyče.



Magnet, který bude umístěn nad bismutovými polokoulemi, bude přilepený k desce o velikosti 200 x 50 mm o tloušťce 10 mm s dvěma otvory po stranách.

Všechny tři desky budou nasazeny na závitové tyče a budou zafixovány z obou stran pomocí matic M10.



**Obrázek 30:** Návrh 3D demonstračního modelu

## 6.2 Sestavení demonstračního modelu

Demonstrační model byl sestaven podle navrhovaného 3D modelu. Základní deska byla vyrobena z materiálu Pertinax o rozměrech 250 x 250 mm o tloušťce 10 mm. Výhodou materiálu Pertinax oproti ostatním materiálům jsou jeho mechanické vlastnosti.

K základní desce byly přišroubovány dva úchyty se závitem M10 ve vzdálenosti 200 mm od sebe. Každý úchyt je přišroubován třemi šrouby s kuželovou hlavou M6x16 k základní desce.

Do úchytů byly našroubovány závitové tyče M10 a přilepeny lepidlem na kov, aby se nepovolovaly.

Na desky o velikosti 200 x 50 mm o tloušťce 10 mm byl použit materiál Pertinax stejně jako u základní desky. Do středu desky byl vyvrtán otvor o průměru 20 mm, do kterého byl přilepen pomocí tavného lepidla bismutový odlitek ve tvaru polokoule (viz obrázek 31). Ve stranách desky 15 mm od okraje byly vyvrtány dva otvory o průměru 12 mm tak, aby šli desky nasadit na závitové tyče.



**Obrázek 31:** Přichycení bismutové polokoule k desce

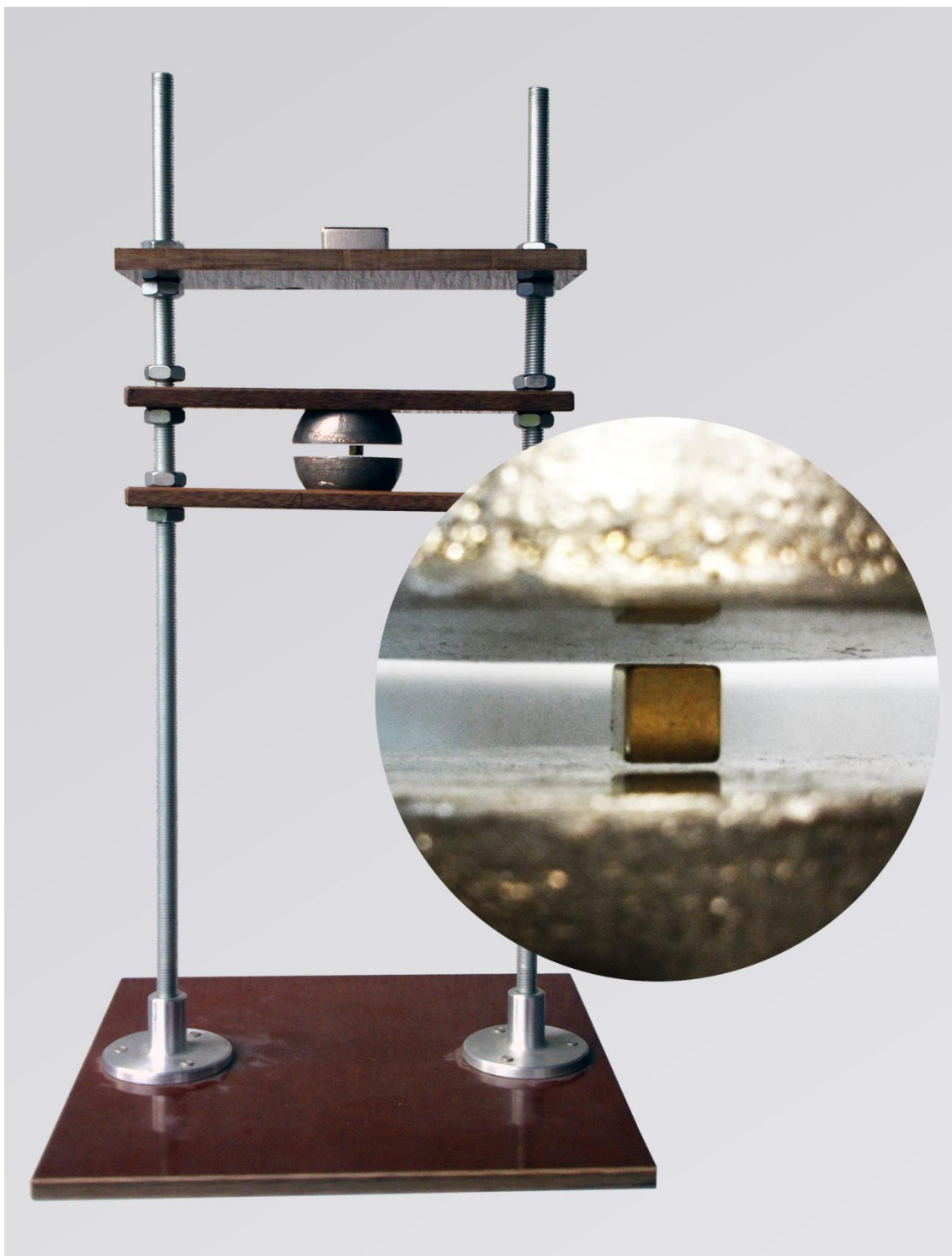
Horní magnet byl přilepen do třetí desky rovněž z materiálu Pertinax, pomocí tavného lepidla. Stejně jako u předchozích dvou desek ve stranách desky 15 mm od okraje byly vyvrtány dva otvory o průměru 12 mm tak, aby šla deska nasadit na závitové tyče.

Všechny tři desky byly nasazeny na závitové tyče M10 stejně jako ve 3D modelu a zafixovány pomocí matic M10. Nakonec byly všechny tři desky nastaveny tak, aby byly vodorovné a tím se magnetická síla vyrovnala s tíhovou silou.

### 6.3 Diamagnetická levitace

Po sestavení modelu pro demonstrační experiment diamagnetické levitace byl mezi dva bismutové odlitky ve tvaru polokoule vložen neodymový magnet o velikosti 5 x 5 x 5 mm a nastal jev diamagnetické levitace (viz obrázek 32).

Experimentálně byla ověřena maximální vzdálenost 10 mm mezi bismutovými odlitky ve tvaru polokoule tj. vzdálenost, kdy ještě vznikne diamagnetická levitace.



**Obrázek 32:** Diamagnetická levitace

## 7 Závěr

Výsledkem bakalářské práce bylo vytvoření modelu pro demonstrační experiment diamagnetické levitace, který by sloužil pro studenty Technické univerzity v Liberci.

Z rešerše, která je uvedena v mé bakalářské práci, jsem vybral pro demonstraci diamagnetické levitace materiál tj. bismut, který má nejmenší permeabilitu materiálu. Pro vybrání nejvhodnějšího modelu z bismutu jsem vytvořil simulaci v programu FEMM s využitím metody konečných prvků. Na základě simulace jsem vypočítal a stanovil nejvhodnější tvar pro model z bismutu ve tvaru polokoule, která nejlépe dokáže neodymový magnet ve tvaru krychle centrovat působením diamagnetických sil.

Nejvhodnější způsob, jak vytvořit polokouli z bismutu je pomocí technologie gravitačního lití do pískové formy. K vytvoření pískové formy jsem si navrhl 3D model v programu Autodesk Inventor. Navržený 3D model byl pomocí 3D tiskárny vytištěn. A následně byl použit k vytvoření pískové formy, která sloužila pro gravitační lití bismutu. Vytvořený bismutový odlitek jsem z pískové formy vyjmul, odřízl jsem vtokovou soustavu. Dále jsem zabrousil rovinnou plochu odlitku a tuto plochu jsem vyleštil pomocí leštící pasty na kov.

Pro výrobu demonstračního modelu jsem nejprve vytvořil 3D model v programu Autodesk Inventor. Pomocí tohoto programu jsem nakreslil výkres pro sestavu demonstračního modelu. Podle tohoto výkresu jsem vyrobil jednotlivé části demonstračního modelu. Z těchto vyrobených částí jsem sestavil demonstrační model pro diamagnetickou levitaci.

Pro demonstraci diamagnetické levitace jsem mezi bismutové odlitky ve tvaru polokoule, které jsou součástí demonstračního modelu, vložil krychlový neodymový magnet a nastavil vzdálenost mezi rovinnými plochami bismutového odlitku, tak aby došlo k diamagnetické levitaci.

Zdárně a úspěšně se mi podařilo realizovat jev diamagnetické levitace za pomoci mnou vyrobeného demonstračního modelu.

S realizací demonstračního modelu diamagnetické levitace jsem velmi spokojen, všechny body zadání jsem včas a úspěšně splnil.

## Použitá literatura

- [1] FEYNMAN, Richard Phillips, Matthew SANDS a Robert B. LEIGHTON.  
*Feynmanovy před-nášky z fyziky s řešenými příklady*. Havlíčkův Brod: Fragment, 2001. ISBN 80-7200-420-4.
- [2] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2198-2.
- [3] MIT - Massachusetts Institute of Technology [online]. Copyright © [cit. 02.04.2018]. Dostupné z:  
<http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/module/guide08.pdf>
- [4] MIT - Massachusetts Institute of Technology [online]. Copyright © [cit. 02.04.2018]. Dostupné z:  
<http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/module/guide09.pdf>
- [5] KOPAL, Antonín. *Fyzika II: elektřina, magnetismus, Maxwellovy rovnice*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. ISBN 9788073723118
- [6] DRAXLER Karel, KAŠPAR Petr, RIPKA Pavel. *Magnetické prvky a měření*. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 1994. ISBN 978-80-01-03970-0
- [7] Neodymium (NdFeB) 1 inch cube magnets. SupraMagnets - Neodymium Magnets - Rare Earth Magnets - Supramagnets [online]. Dostupné z:  
<https://www.supramagnets.com/cubes/76-1-inch-cube-neodymium-magnets-n48-0094922873316.html>
- [8] MEEKER, David. *Magnetic Circuit Derivation of Energy Stored in a Permanent Magnet. Finite Element Method Magnetism: PMEnergy* [online]. 2007, č. 4, 2010-12-27 [cit. 02. 04. 2018]. Dostupné z: <http://www.femm.info/wiki/PMEnergy>



- [9] Metoda konečných prvků - Wikiwand. Wikiwand [online]. [cit. 13. 4. 2018].  
Dostupné z:  
[http://www.wikiwand.com/cs/Metoda\\_kone%C4%8Dn%C3%BDch\\_prvk%C5%AF](http://www.wikiwand.com/cs/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF)
- [10] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. *3D tisk*. Přeložil Petra MILLAROVÁ. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [11] ČADA, Radek. *Technologie tváření, slévání a svařování: plastická deformace kovů, tažení plechu, ohýbání, objemové tváření zastudena*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3981-3.
- [12] PLÍVA, Zdeněk. *Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací* [online]. [vid. 18.4.2018]. Dostupné z: <http://new.fm.tul.cz/files/Jak-psat-BP-DP.pdf>

## **A Přílohy**

### **A.1 Příloha bakalářské práce**

1. Výkres sestavy demonstračního modelu

### **A.2 Obsah na CD**

1. Bakalářská práce
2. Simulační program FEMM 4.2
3. 3D model pro bismutový odlitek
4. 3D model sestavy demonstračního modelu

